

Estimación de la potencia eléctrica teórica disponible en Río Copinula, Jujutla, Ahuachapán

Erick Alexander Blanco Guillén¹

Resumen:

Este artículo presenta la metodología utilizada en un estudio previo a la prefactibilidad para la estimación de la potencia eléctrica teórica que puede obtenerse en el Río Copinula, municipio de Jujutla, departamento de Ahuachapán. Finalmente se utilizó el software HIDRO 3®, con el cual se hizo una comparación de potencia con la potencia calculada teóricamente.

Palabras clave: Potencia eléctrica, centrales hidráulicas, generación eléctrica, energía minihidráulica.

Abstract

This paper presents the methodology used in a previous study about the prefeasibility to estimate the theoretical electrical power that can be obtained at Copinula River, Township Jujutla, Ahuachapán department. Finally, the software HIDRO 3® was used, whereby a power comparison was made with the output power calculated theoretically.

Keywords: Electric power, hydroelectric power stations, electric power generation, tiny-hydropower.

1. Introducción

La energía minihidráulica aprovechando los caudales y saltos de los ríos representa una alternativa para la generación de electricidad, en países como El Salvador, fomentando el desarrollo de las comunidades cercanas al sitio de instalación de alguna central de esta clase. Es por ello que se vuelve imperante investigar sobre nuevas fuentes de generación de electricidad con este tipo de tecnología, iniciando con la estimación de la potencia teórica que podría obtenerse en un río en particular, para lo cual es de suma importancia identificar la zona geográfica e iniciar el estudio relacionado con la hidrología del lugar. Ello lleva a investigar lo relacionado con la ubicación y el comportamiento de las características meteorológicas que rigen la zona en donde se encuentra el río sobre el cual se desea realizar la estimación. Poseer registros históricos del comportamiento de un río es la base

para la realización de los cálculos de la potencia teórica que se puede obtener del mismo.

Es importante mencionar que no todo el caudal que posee un río se puede destinar hacia las turbinas para generar potencia, ya que es necesario establecer el caudal ecológico o ambiental para no entorpecer las condiciones del ecosistema en donde se encuentra el río. La potencia teórica estimada en el río está principalmente relacionada con las condiciones de caudal y salto del lugar, así como de las eficiencias de los principales equipos y dispositivos que se utilizan en este tipo de central.

Existen en el mercado herramientas de software que permiten calcular la potencia que se puede obtener de un río y realizar simulaciones con diferentes equipos para escoger la combinación de los mismos que mejor se adapte a las necesidades de un proyecto

1. El autor es Máster en Gestión de Energías Renovables. Docente de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Facultad de Ingeniería, Universidad Don Bosco. (erick.blanco@udb.edu.sv)

Fecha de recepción: 15/04/2012; Fecha de aceptación: 21/05/2012.

en particular, brindando así una forma de comparar diferentes condiciones de trabajo, optimizando el funcionamiento de la central que se desea construir, con base a los registros históricos disponibles.

2. Generalidades de la hidrología de un lugar

La hidrología de un lugar es compleja ya que involucra una gran cantidad de variables. Sin embargo, para el caso de un estudio previo a la etapa de prefactibilidad los principales aspectos a considerar son aquellos que tiene que ver con los recursos superficiales, acuíferos subterráneos, drenajes, caudales, humedad, evaporación, escorrentía superficial, precipitaciones, infiltración, recarga de lluvia y cambio de almacenamiento. También es necesario considerar los aspectos que rigen el comportamiento de la hidrología del lugar, considerando para ello el clima, la fisiografía, temperatura, precipitaciones, vientos, humedad relativa, presión atmosférica, radiación, luz solar, nubosidad y orografía de la zona.

Realizar mediciones e investigaciones sobre el comportamiento histórico de los aspectos mencionados anteriormente proporciona la base para proceder a evaluar el potencial que posee un recurso como los ríos y establecer además las características que debe tener la central, en cuanto a su infraestructura y tecnología a utilizar, de acuerdo a las condiciones propias del lugar.

3. Generalidades sobre las centrales hidráulicas

Al realizar un estudio del potencial hidráulico que posee un río en particular es importante mencionar

que en términos de ingeniería se debe considerar dicho potencial con respecto a la energía cinética relacionada con el movimiento del agua y a la energía potencial que depende de la altura a la cual el agua está disponible. Esta altura se conoce como salto.

Actualmente entre los muchos usos que se le da a la energía hidráulica se encuentra la generación de electricidad, tomando como base los caudales de los ríos, en los cuales se hacen obras civiles para aprovechar al máximo el potencial disponible. Entre las obras más comunes de este tipo se encuentran los diques y las tuberías forzadas, que dirigen el flujo de agua hacia la casa de máquinas, en donde se encuentran las turbinas y los generadores eléctricos.

Dentro de las centrales hidráulicas, las que se consideran minicentrales son muy importantes en el desarrollo de los países ya que se requiere de una inversión menor a la que se requiere para aquellas de mayor capacidad, además, las minicentrales presentan un menor impacto ambiental, lo que en la actualidad es muy importante considerar.

Cabe mencionar que no existe una clasificación unificada en todo el mundo sobre las centrales hidroeléctricas, por lo que es necesario tomar de referencia a organizaciones regionales que poseen vasta experiencia en el desarrollo de este tipo de instalaciones. En la Tabla 1, se presenta la clasificación para el caso de los países latinoamericanos.

Tabla 1. Capacidad de generación para diferentes tipos de instalaciones, según la OLADE².

TIPO DE INSTALACIÓN	TIPO DE INSTALACIÓN	CAPACIDAD MÁXIMA (kW)
Pequeñas centrales	Pequeñas centrales	500 – 5.000
Minicentrales	Minicentrales	50 – 500
Microcentrales	Microcentrales	< 50

2. Organización Latinoamericana de Energía.

Además de la capacidad de generación se puede hacer una clasificación con base en las características que posee la instalación de las centrales para la producción de electricidad, las cuales pueden ser principalmente de los siguientes tipos:

- a) De agua fluyente. En este tipo de instalación no se regula el caudal de agua que se dirige hacia las turbinas; el funcionamiento de este tipo de central se basa principalmente en que la turbina que acciona al generador está en operación, siempre y cuando por dicha turbina circule un caudal mínimo de operación. Si el caudal no es lo suficiente se detiene la operación del grupo turbina generador y no hay generación de electricidad. Este tipo de infraestructura requiere menos inversión en lo referente a obras civiles.
- b) De pie de presa. Con estas instalaciones es necesaria la construcción de un embalse que permita el almacenamiento de un porcentaje de agua del río, permitiendo regular el caudal que se desea desviar hacia las turbinas. Este tipo de infraestructura posee la ventaja de que se tiene control de cuándo se puede realizar la generación eléctrica de acuerdo a las necesidades que se desean cubrir, sin embargo, requiere una alta inversión en obra civil y generalmente mayor alteración del ecosistema del lugar de instalación.

Independientemente del tipo de central que se utilice la energía hidráulica tiene su origen en el ciclo hidrológico, en el cual el sol posee gran importancia, pues él contribuye al inicio y continuidad de este ciclo. Dicho ciclo inicia cuando el sol calienta la superficie terrestre evaporando el agua contenida en las grandes extensiones de agua, como océanos y lagos; este calentamiento produce el vapor que se transporta a las grandes masas continentales por medio de los

vientos y las condiciones atmosféricas, luego, el vapor se condensa y forma las nubes, las cuales a su vez provocan precipitaciones o lluvias encargadas de alimentar e incrementar los caudales de los ríos presentes en diferentes zonas de los países.

Es precisamente con base en lo anteriormente descrito que cobran importancia las investigaciones relacionadas con las condiciones hidrológicas de los ríos, de los cuales interesa estimar su potencial, ya que es en los mismos en donde se construyen las centrales para aprovechar el recurso energético hidráulico, para convertirlo en electricidad mediante la desviación de parte del caudal para efectos de dirigirlo a las turbinas. Una vez el caudal desviado ha pasado por las turbinas de la central éste se incorpora al caudal original y finalmente el río desemboca en lagos o en mares que forman parte de los océanos, a los cuales el sol volverá a calentar y el ciclo se repetirá una vez más de manera continua.

4. Potencial de la energía hidráulica en El Salvador

En El Salvador se consideran dos estaciones durante el año, la seca y la lluviosa, ésta última se caracteriza por precipitaciones desde leves a fuertes, las cuales duran un aproximado de seis meses entre Mayo a Octubre. En la Tabla 2, se muestran detalles de la duración aproximada de las estaciones climáticas.

Durante la época lluviosa se considera que el potencial hidráulico que se puede explotar es alto, y la generación de energía eléctrica con base en este tipo de centrales cobra una marcada importancia. El Salvador posee accidentes geográficos que, junto con los ríos, contribuyen a que se explote este tipo de energía, ya que se cuenta con elevaciones de terrenos que favorecen la creación de saltos de agua que permiten obtener un alto grado de aprovechamiento de la energía potencial del agua con esas alturas.

Tabla 2. Duración aproximada de las estaciones climáticas en El Salvador³.

ÉPOCA DEL AÑO	PRINCIPIO	Final	DÍAS
Estación Seca	14 Noviembre	19 Abril	157
Transición Seca-Lluviosa	20 Abril	20 Mayo	31
Estación Lluviosa	21 Mayo	16 Octubre	149
Transición Lluviosa –Seca	17 Octubre	13 Noviembre	28

3. Tabla extraída de “Caracterización de los riesgos geológicos y dimensionamiento de los recursos hidrogeológicos de Nejapa”, realizado por Geólogos del Mundo y UCA en Agosto de 2003.

En El Salvador durante los meses de Abril y Mayo se presentan las primeras lluvias, las cuales marcan la transición de la época seca a la época lluviosa; específicamente, en la zona geográfica de interés las cantidades de lluvia son del orden de los 10 a 20 mm en la franja central y costera occidental, incrementándose para el mes de abril a cantidades de 20 y 30 mm, hasta 40 y 50 mm en forma más generalizada [1].

El municipio de Jujutla, departamento de Ahuachapán, de acuerdo a registros históricos del Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos (PLAMDARH, 1981), se considera perteneciente a la Región C y se cataloga como zona de máxima precipitación [2].

Es importante mencionar que si bien es cierto el potencial hidráulico está presente en la mayoría de las regiones de un país, no todo ese potencial puede aprovecharse, ya que hay lugares en los que el agua de los ríos está en ubicaciones en las cuales el acceso se vuelve muy difícil y por ende su aprovechamiento también, motivo por el cual es necesario identificar posibles lugares de interés y considerar caudales medios de los ríos para estimar el potencial hidráulico.

En términos de electricidad lo más importante es relacionar el potencial hidráulico con la potencia eléctrica en watts que puede obtenerse. La potencia que se puede obtener del recurso hidráulico se estima utilizando la siguiente ecuación:

$$P = \rho g Q H \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde, “ ρ ” es la densidad del agua y para efecto de cálculo se toma como 1000 kg/m^3 , “ g ” representa la aceleración de la gravedad con un valor de 9.8 m/s^2 , “ Q ” representa el caudal de agua en m^3/s que se desvía hacia las turbinas y “ H ” es la altura o distancia medida entre la parte alta y la parte baja de una cascada del río, esta distancia es conocida también como salto bruto y se expresa en metros. Con base a lo descrito, si se desea estimar la potencia eléctrica teórica en un río en particular se deben establecer los parámetros de caudal y salto para dicho río.

5. Cálculo de caudal en el río Copinula

Para estimar los caudales promedio, en la zona geográfica en la cual se pretende instalar la central, es necesario obtener información de estaciones meteorológicas instaladas idealmente en la zona, tomar datos de la estación más cercana al sitio de la posible instalación o, si es factible, realizar mediciones en el sitio. Entre los datos que son de mayor importancia se encuentran los caudales instantáneos máximos y los promedios diarios, mensuales o anuales, los cuales dependen principalmente de las precipitaciones que se dan en la zona de interés, para lo cual se cuenta con una serie de datos y mapas que proporcionan una visión del comportamiento climatológico de la zona.

En el caso de la realización de las mediciones in situ, lo que se hizo fue medir la velocidad de la corriente de agua y el área de la sección transversal que dicha corriente corta, luego el caudal se determinó empleando la siguiente ecuación:

$$Q = vA \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde “ v ” representa la velocidad de la corriente de agua en m/s y “ A ” se refiere al área de sección transversal en m^2 que atraviesa dicha corriente.

El método empleado para determinar el área “ A ” de sección transversal, consistió en subdividir el área transversal total del río en el punto de medición en varias áreas más pequeñas, para lo cual en la parte superior se divide el ancho del río de manera equidistante y a cada una de esas distancias se mide la profundidad del río denominando a dichas profundidades (h_1, h_2 hasta h_n), como se muestra en la Figura 1.

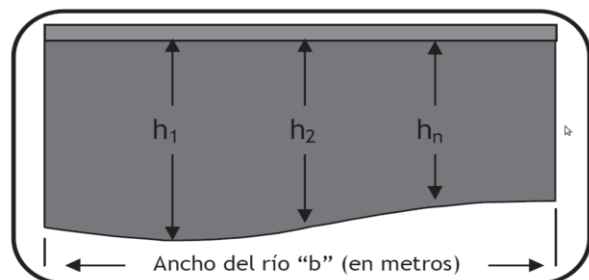


Figura 1. Método para la determinación del área transversal.

En la Figura 2, se muestra el primer punto de interés en el río Copinula para estimar el caudal y el esquema de las mediciones de profundidades.

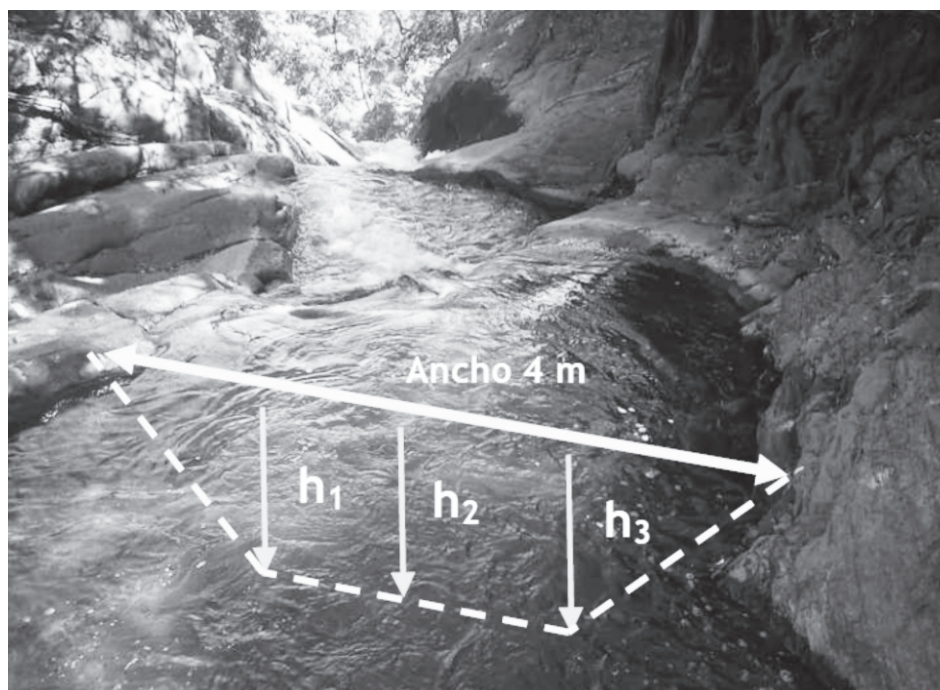


Figura 2. Área transversal Río Copinula, en el punto uno.

Una vez se realizan las mediciones de profundidad, se procede a calcular el área con la ecuación 3.

$$A = b \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{n} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Para el caso del punto 1, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos en río Copinula para determinar área de punto 1 de interés.

PARÁMETRO	MEDICIÓN EN CM
Ancho de río (b)	400
Profundidad 1 (h1)	34
Profundidad 2 (h2)	24
Profundidad 3 (h3)	70

Por lo tanto el área aproximada para este primer punto se determina a continuación.

$$\text{Área_punto_1} = 4 * \frac{0.34 + 0.24 + 0.7}{3} = 1.70 \text{ M}^2$$

En el punto 2, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos de mediciones, en río Copinula para determinar área de punto 2 de interés.

PARÁMETRO	MEDICIÓN EN CM
Ancho de río (b)	400
Profundidad 1 (h1)	32
Profundidad 2 (h2)	28
Profundidad 3 (h3)	21

Para este segundo punto el área aproximada es:

$$\text{Área}_{\text{punto}_2} = 4 * \frac{0.32 + 0.28 + 0.21}{3} = 1.08 \text{ m}^2$$

Una vez se tiene el área el único parámetro desconocido para determinar el caudal en ambos puntos es la velocidad. Para determinar esta última lo que se hizo es obtener una velocidad promedio de la corriente de agua, esto se logró empleando un molinete como el de la Figura 3, midiendo la velocidad de la corriente de agua en los mismos puntos

correspondientes a las diferentes profundidades en las que se dividió la sección transversal del río. Los molinetes más utilizados están provistos con hélices que transmiten un impulso eléctrico a un contador por cada vuelta de la hélice. A continuación se muestra el molinete que se utilizó para medir la velocidad en el río Copinula.

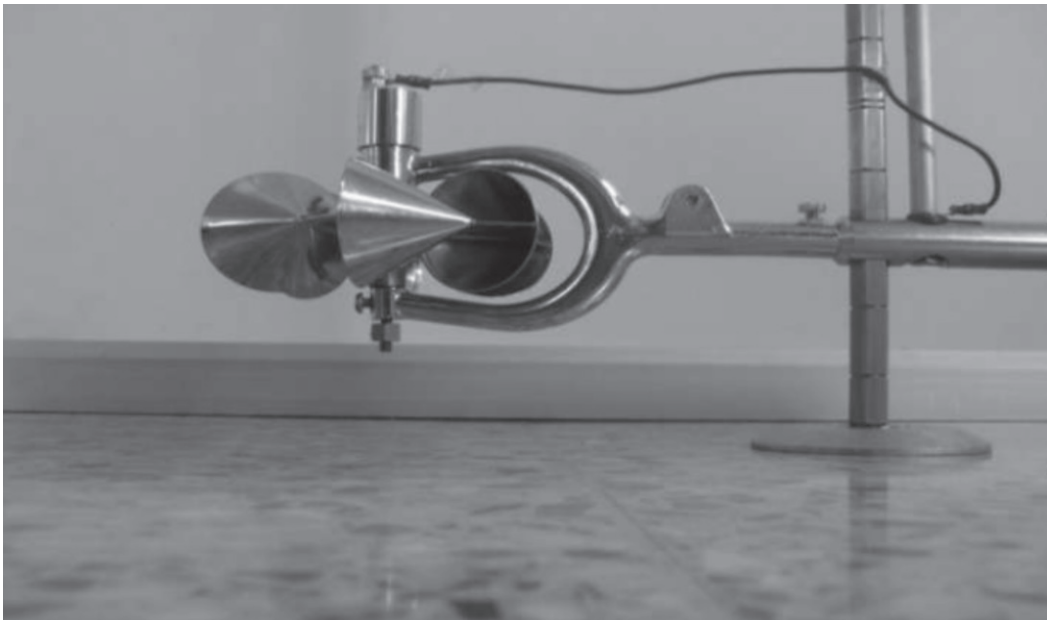


Figura 3. Molinete para medir velocidad en río Copinula. Fotografía cortesía de la Sala Científica Estadounidense para la Investigación en Energía, de la Universidad Don Bosco.

La realización de las mediciones implica contar los pulsos eléctricos asociados a las revoluciones del molinete en los puntos de interés, en un determinado

período de tiempo. Para este proyecto se utilizó un tiempo de 60 s; los datos promedios se muestran en las Tablas 5 y 6.

Tabla 5. *Revoluciones de molinete para primer punto de interés, en el lugar conocido como “Los Encuentros”.*

PROFUNDIDAD (CM)	MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MEDICIÓN 3	MEDICIÓN 4	MEDICIÓN 5	PROMEDIO
34	25	28	26	29	29	27.4
24	31	30	30	32	31	30.8
70	12	13	18	13	15	14.2

Tabla 6. *Revoluciones de molinete para segundo punto de interés, en el lugar conocido como “El Salto”.*

PROFUNDIDAD (CM)	MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MEDICIÓN 3	MEDICIÓN 4	MEDICIÓN 5	PROMEDIO
32	40	40	40	36	41	39.4
28	41	43	44	45	40	42.6
21	41	43	40	42	39	41

Con los datos de las Tablas 5 y 6, se procede a determinar la velocidad en m/s a partir de una tabla proporcionada por el fabricante del equipo⁴, la cual se presenta en la Figura 4. Se ha remarcado la franja de tiempo utilizada en este estudio, es decir los 60 segundos; además en el caso de que el número de revoluciones no coincida exactamente con los datos mostrados en la tabla, se ha tomado la velocidad que

corresponde a las revoluciones más cercanas y si las revoluciones medidas se encuentran en un punto intermedio, se ha tomado la inferior más cercana a las promedios que se muestran en las tablas 5 y 6. Por ejemplo, para el valor promedio de 27.4, se ha tomó el valor de 25 revoluciones, esto con base al criterio de hacer una estimación conservadora.

4. Tabla cortesía de Rickly Hidrological Co. Columbus. Ohio.

Figura 4. Variables para establecer velocidad con base en mediciones realizadas con molinete.

METRIC STANDARD RATING TABLE NO. 2 FOR AA CURRENT METERS (6/99) - VELOCITY IN METERS PER SECOND																		
TIME IN SECS	REVOLUTIONS																	
	3	5	7	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	150	200	250	300	350
40	0.056	0.089	0.123	0.173	0.257	0.341	0.425	0.509	0.677	0.845	1.013	1.349	1.635	2.526	3.366	4.206	5.046	5.886
41	0.055	0.087	0.120	0.169	0.251	0.333	0.415	0.497	0.661	0.825	0.989	1.317	1.645	2.464	3.284	4.103	4.923	5.742
42	0.053	0.085	0.117	0.165	0.245	0.325	0.405	0.485	0.645	0.805	0.965	1.285	1.635	2.406	3.206	4.006	4.806	5.606
43	0.052	0.084	0.115	0.162	0.240	0.318	0.396	0.474	0.631	0.787	0.943	1.256	1.558	2.350	3.131	3.913	4.694	5.475
44	0.051	0.082	0.112	0.158	0.235	0.311	0.387	0.464	0.616	0.769	0.922	1.227	1.533	2.296	3.060	3.824	4.587	5.351
45	0.050	0.080	0.110	0.155	0.229	0.304	0.379	0.453	0.603	0.752	0.901	1.200	1.499	2.246	2.992	3.739	4.486	5.232
46	0.049	0.078	0.108	0.152	0.225	0.298	0.371	0.444	0.590	0.736	0.882	1.174	1.456	2.197	2.927	3.658	4.388	5.119
47	0.048	0.077	0.106	0.148	0.220	0.291	0.363	0.434	0.577	0.720	0.863	1.149	1.435	2.150	2.865	3.580	4.295	5.010
48	0.047	0.075	0.103	0.145	0.215	0.285	0.355	0.425	0.565	0.705	0.845	1.125	1.435	2.105	2.806	3.506	4.206	4.906
49	0.047	0.074	0.101	0.143	0.211	0.280	0.348	0.417	0.554	0.691	0.828	1.103	1.377	2.063	2.748	3.434	4.120	4.806
50	0.046	0.073	0.100	0.140	0.207	0.274	0.341	0.409	0.543	0.677	0.812	1.081	1.349	2.021	2.694	3.366	4.038	4.710
51	0.045	0.071	0.098	0.137	0.203	0.269	0.335	0.401	0.533	0.664	0.796	1.060	1.323	1.982	2.641	3.300	3.959	4.617
52	0.044	0.070	0.096	0.135	0.199	0.264	0.329	0.393	0.522	0.652	0.781	1.039	1.298	1.944	2.590	3.236	3.882	4.529
53	0.043	0.069	0.094	0.132	0.196	0.259	0.322	0.386	0.513	0.639	0.766	1.020	1.273	1.907	2.541	3.175	3.809	4.443
54	0.043	0.068	0.093	0.130	0.192	0.254	0.317	0.379	0.503	0.628	0.752	1.001	1.250	1.872	2.494	3.117	3.739	4.361
55	0.042	0.067	0.091	0.128	0.189	0.250	0.311	0.372	0.494	0.616	0.739	0.983	1.227	1.838	2.449	3.060	3.671	4.282
56	0.041	0.065	0.089	0.125	0.185	0.245	0.305	0.365	0.485	0.605	0.725	0.965	1.235	1.805	2.406	3.006	3.606	4.206
57	0.041	0.064	0.088	0.123	0.182	0.241	0.300	0.359	0.477	0.595	0.713	0.949	1.184	1.774	2.363	2.953	3.542	4.132
58	0.040	0.063	0.087	0.121	0.179	0.237	0.295	0.353	0.469	0.585	0.701	0.932	1.154	1.743	2.323	2.902	3.481	4.061
59	0.040	0.062	0.085	0.119	0.176	0.233	0.290	0.347	0.461	0.575	0.689	0.917	1.144	1.714	2.283	2.853	3.422	3.992
60	0.039	0.061	0.084	0.117	0.173	0.229	0.285	0.341	0.453	0.565	0.677	0.901	1.125	1.685	2.246	2.806	3.366	3.926
61	0.038	0.061	0.083	0.116	0.171	0.226	0.281	0.336	0.446	0.556	0.666	0.887	1.137	1.658	2.209	2.760	3.310	3.861
62	0.038	0.060	0.081	0.114	0.168	0.222	0.276	0.331	0.439	0.547	0.656	0.873	1.099	1.631	2.173	2.715	3.257	3.799
63	0.037	0.059	0.080	0.112	0.165	0.219	0.272	0.325	0.432	0.539	0.645	0.859	1.072	1.605	2.139	2.672	3.206	3.739
64	0.037	0.058	0.079	0.110	0.163	0.215	0.268	0.320	0.425	0.530	0.635	0.845	1.055	1.580	2.105	2.631	3.156	3.681
65	0.036	0.057	0.078	0.109	0.161	0.212	0.264	0.316	0.419	0.522	0.626	0.833	1.039	1.556	2.073	2.590	3.107	3.624
66	0.036	0.056	0.077	0.107	0.158	0.209	0.260	0.311	0.413	0.515	0.616	0.820	1.024	1.533	2.042	2.551	3.060	3.569
67	0.036	0.056	0.076	0.106	0.156	0.206	0.256	0.306	0.407	0.507	0.607	0.808	1.008	1.510	2.011	2.513	3.014	3.516
68	0.035	0.055	0.075	0.104	0.154	0.203	0.252	0.302	0.401	0.500	0.598	0.796	0.994	1.488	1.982	2.476	2.970	3.464
69	0.035	0.054	0.074	0.103	0.152	0.200	0.249	0.298	0.395	0.492	0.590	0.785	0.979	1.466	1.953	2.440	2.927	3.414
70	0.034	0.053	0.073	0.101	0.149	0.197	0.245	0.293	0.389	0.485	0.581	0.773	0.955	1.445	1.925	2.406	2.886	3.366

Con base en los criterios expuestos se obtuvieron los resultados promedios mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7. Velocidades medidas en el río Copinula.

PARÁMETRO	VELOCIDAD EN PUNTO 1 (M/S)
Profundidad 1	0.285
Profundidad 2	0.341
Profundidad 3	0.173
Valores promedio	0.266

En la Tabla 7, el punto 2 (El Salto) es el que ofrece las mejores velocidades promedios; sin embargo, la velocidad no es el único parámetro del río que interesa evaluar, ya que ella sólo representa un parámetro para determinar el caudal que pasa por los diferentes

puntos, este caudal, como se expresa en la Ecuación 2, depende también del área que atraviesa la corriente agua, por lo que para tomar una decisión del punto de mayor interés es necesario calcular los caudales en ambos puntos:

$$Q_{en\ punto1} = vA = 0.266 \text{ m/s} * 1.7 \text{ m}^2 = 0.452 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{en\ punto2} = vA = 0.453 \text{ m/s} * 1.08 \text{ m}^2 = 0.489 \text{ m}^3/\text{s}$$

Estos caudales son los que se han calculado con base a mediciones de área y velocidades promedios realizadas en los sitios de interés. Se realizaron mediciones durante los meses de septiembre y diciembre con el propósito de tener muestras de meses de la época lluviosa y la época seca. Es importante mencionar que los dos caudales calculados son representativos, pero no definitivos, ya que solo sirven para establecer que el punto dos presenta mayor caudal, sin embargo, el valor de 0.489 m³/s no representa el valor a utilizar en los cálculos de la potencia teórica puesto que deben considerarse también registros históricos con lo que se cuenta en la actualidad. Esta información proporciona caudales promedios anuales del río Copinula durante 17 años (de 1959 a 1976), estableciendo un valor cercano a los 0.65 m³/s [2].

No todo el caudal presente en el río Copinula se va a destinar hacia las turbinas, es necesario considerar no interferir con el ecosistema del lugar, por lo que

es imprescindible determinar el porcentaje de caudal que se desviará para utilizarlo en las turbinas y el respectivo caudal ecológico.

El caudal ecológico consiste en la reserva de agua que deberá mantenerse en todo cauce natural de aguas superficiales, corrientes o detenidas, no agotado, en la cantidad necesaria para permitir la subsistencia de la vida animal y vegetal que le son naturalmente propias, incluyendo la necesaria para el mantenimiento de humedades y ecosistemas estuarianos [3].

Existen varios métodos para calcular el caudal ecológico o caudal ambiental, sin embargo por los escasos datos que se poseen para el río Copinula, se opta trabajar con el Método CEMAGREF [4], el cual fue desarrollado en Francia y sugiere un valor de caudal ecológico que varíe del 2.5% al 10% del flujo medio mensual. La fórmula que se utiliza es:

$$Q_{ecológico\ mensual} = \left(\frac{0.0651 * Q_{MM} + 2}{100} \right) 0 * Q_{MA} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde: QMM es caudal medio mensual

QMA es caudal medio anual

Para trabajar la fórmula CEMAGREF el valor que se utilizará para QMM es el caudal mínimo del que se tiene registro según la Tabla 8, es decir, 0.5532 m³/s para el mes de marzo, el cual, se considera un mes

perteneciente a la estación seca, lo que permite hacer consideraciones muy prudentes en cuanto a los diferentes tipos de caudales. Mientras que para el valor de Caudal Anual Medio (QAM) se utilizará el valor promedio de los caudales mensuales presentes en la misma Tabla, siendo el promedio de 1.5717 m³/s.

Tabla 8. Caudales medios mensuales para cuenca y microcuenca Copinula.

MES	FACTOR	CAUDAL MEDIO MENSUAL (M³/S)	CAUDAL MEDIO MENSUAL, AGUAS ARRIBA (M³/S)
Enero	0.397	1.0978638	0.6239252
Febrero	0.361	0.9983094	0.5673476
Marzo	0.352	0.9734208	0.5532032
Abril	0.411	1.1365794	0.6459276
Mayo	0.701	1.9385454	1.1016916
Junio	1.436	3.9711144	2.2568176
Julio	1.347	3.7249938	2.1169452
Agosto	1.603	4.4329362	2.5192748
Septiembre	2.35	6.49869	3.69326
Octubre	1.893	5.2349022	2.9750388
Noviembre	0.721	1.9938534	1.1331236
Diciembre	0.429	1.1863566	0.6742164
PROMEDIO			1.5717

En la Figura 5, se grafican los valores correspondientes al caudal medio mensual aguas arriba.

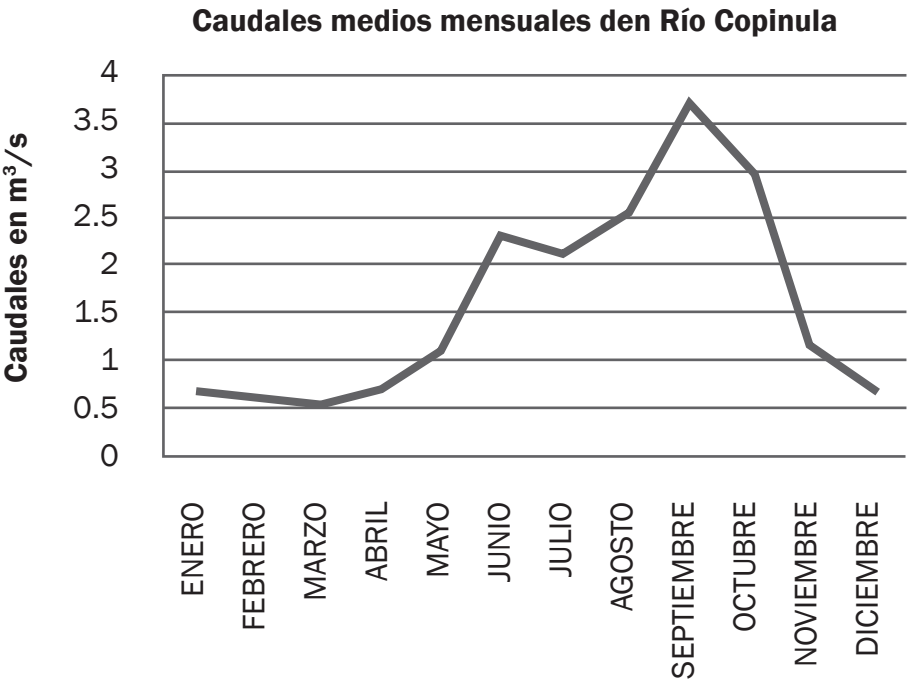


Figura 5. Caudales medios mensuales aguas arriba de los saltos de agua en río Copinula, tomando de referencia datos obtenidos en la Tabla 8.

Teniendo estos valores, y aplicando la fórmula que establece el método CEMAGREF, el caudal ecológico mensual para el Río Copinula sería:

$$Q_{\text{ecológico}}_{\text{mensual}} = \left(\frac{0.0651 * 0.5532 + 2}{100} \right) * 1.5717$$

$$= 0.032 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Tomando como base el mes con el menor caudal correspondiente a 0.5532 m³/s, el porcentaje de caudal ecológico con respecto al caudal mensual sería:

$$Q_{\text{ecológico}}_{\text{mensual}} = \left(\frac{0.032}{1.5717} \right) * 100\% = 2.03\%$$

Este porcentaje de caudal ecológico se encuentra abajo del rango que maneja el método CEMAGREF, es decir entre el 2.5% y el 10%. Por lo que si se requiere tener una idea del caudal ecológico mensual

que debería tenerse para el río Copinula se debe considerar el 2.5% del caudal medio mensual mínimo para cumplir con CEMAGREF, por lo que el caudal ecológico sería:

$$Q_{\text{ecológico}} = \left(1.5717 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) * .025 = 0.039 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Si al caudal promedio de 1.5717 m³/s se le resta el caudal ecológico, se determina el caudal para destinar hacia las turbinas de:

$$Q_{\text{turbinas}} = \left(1.5717 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) - \left(0.039 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

$$= 1.5317 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El último parámetro de interés para determinar el potencial hidráulico que se puede obtener del río Copinula es el salto, el cual se muestra en la Figura 6.

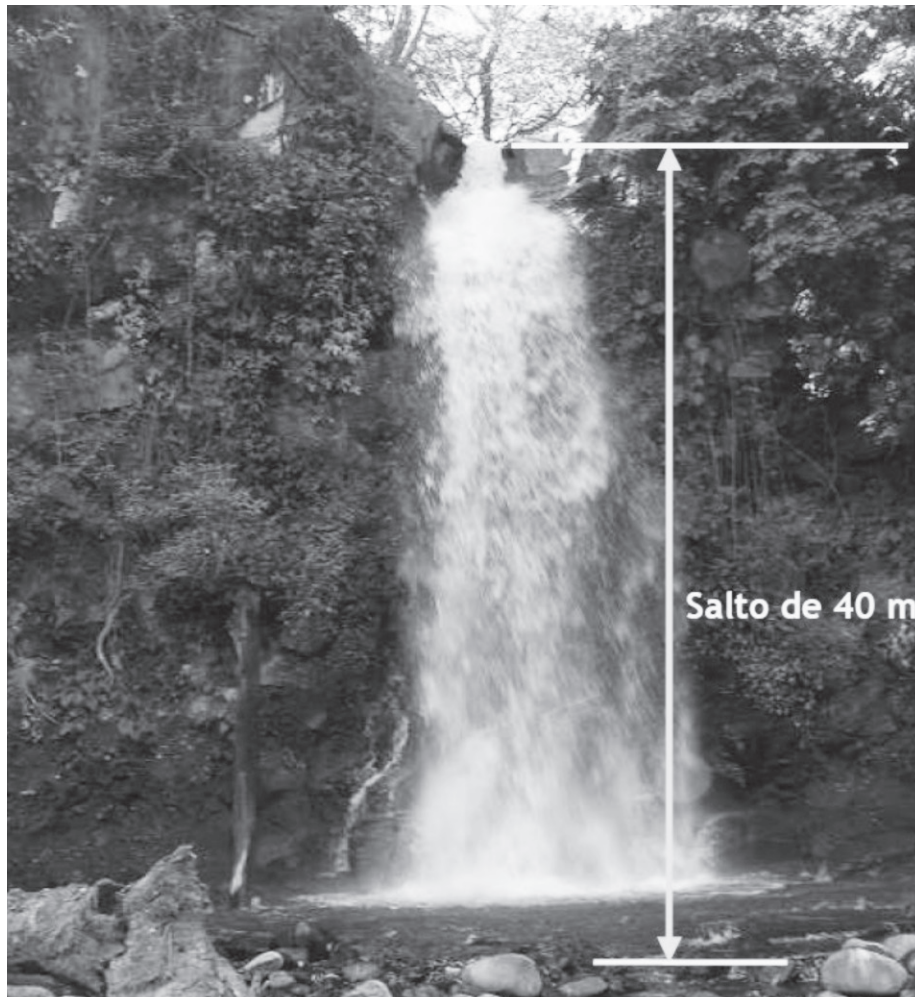


Figura 6. Salto en el río Copinula, en el lugar conocido como “El Salto”.

Como se ha mencionado para la estimación del potencial hidráulico que posee un río es de suma importancia, también, determinar el salto bruto, el cual se establece como la distancia vertical que existe entre el punto más alto de la cascada y el punto más bajo de la misma. Dicha distancia se representa con la letra H y se expresa en metros. La medición de este parámetro se puede hacer de varias formas, una de las cuales consiste en realizar la medición utilizando un teodolito electrónico, sin embargo, en

el caso de los saltos del río Copinula las mediciones se realizaron con cintas métricas de 50 metros. En la figuras 6 se muestra el salto de interés a considerar en el río Copinula.

La potencia teórica disponible que se obtendría del río Copinula se puede estimar con base a los datos medidos y obtenidos de fuentes como el SNET⁵. Para ello retomamos la Ecuación 1, evaluando para la altura de 40 m.

$$P = \rho g Q H = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1.5327 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 40 \text{m}$$

$$P = 600818.4 \text{ W} \approx 600 \text{ kW e}$$

Este dato de potencia sería una primera aproximación de la potencia eléctrica que se puede generar en este río. Para el caso particular de la central que se podría instalar en el río Copinula el tipo de instalación sería de agua fluyente, en la cual se haría una infraestructura civil que básicamente consistiría de un pequeño dique que permita almacenar un volumen de agua que facilite, por medio de una tubería forzada, garantizar y conducir el caudal a turbinar ($1.5327 \text{ m}^3/\text{s}$) así como permitir el paso del caudal ecológico ($0.039 \text{ m}^3/\text{s}$).

Para realizar una segunda estimación de la potencia teórica más cercana a la práctica se deben considerar aspectos relacionados principalmente con los rendimientos que poseen los dispositivos más representativos que conforman este tipo de central, como por ejemplo las turbinas, los multiplicadores, generadores y transformadores eléctricos, así como las pérdidas de carga relacionada con la obra civil, como se muestra en la Figura 7.

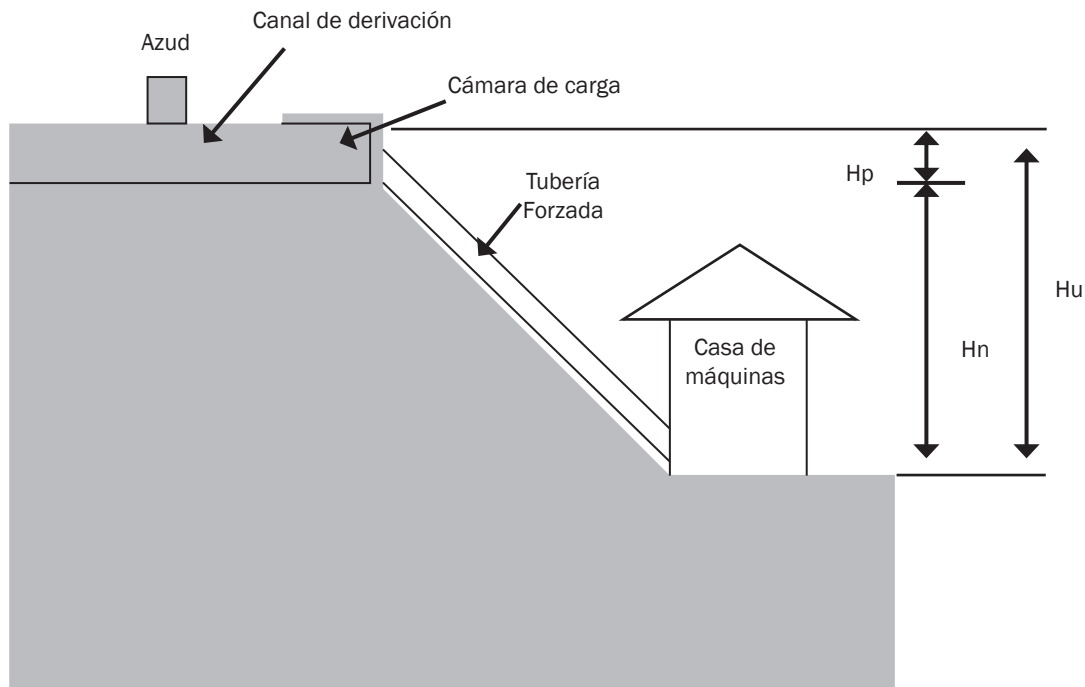


Figura 7. Saltos a considerar para la estimación de energía eléctrica.

5. Sistema Nacional de Estudios Territoriales, de El Salvador (<http://www.snet.gob.sv/>).

Considerando el planteamiento anterior se presenta la fórmula utilizada para calcular esta segunda estimación de potencia teórica disponible de manera más depurada.

$$P = 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right] * p \left[\frac{kg}{m^3} \right] * Q \left[\frac{m^3}{s} \right] * H_n [m] \\ * \eta_t * \eta_m * \eta_g * \eta_{tr} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

H_n = salto neto = Salto útil (H_u) – Pérdidas de carga (H_p)⁶

η_t = Rendimiento de la turbina

η_m = Rendimiento del multiplicador

η_g = Rendimiento del generador

η_{tr} = Rendimiento del transformador de salida

Aplicando la fórmula anterior para un salto neto de 38.5m y asumiendo los siguientes rendimientos:

H_n = salto neto = Salto útil (H_u) – Pérdidas de carga (H_p)
= 40 m – 1.5 m = 38.5 m

η_t = Rendimiento de la turbina = 0.834

η_m = Rendimiento del multiplicador = 0.9

η_g = Rendimiento del generador = 0.95

η_{tr} = Rendimiento del transformador de salida = 0.98

La potencia teórica sería:

$$P = 9.8 \frac{m}{s^2} * 1000 \frac{kg}{m^3} * 1.5327 \frac{m^3}{s} * 38.5m * 0.834 \\ * 0.9 * 0.95 * 0.98$$

$$P = 404,112.425 \text{ W} \approx 400 \text{ k W e}$$

Si se desea un cálculo más preciso se pueden estimar las pérdidas en los conductos utilizando la ecuación de Darcy y Weisbach, la cual es aplicable a flujos laminares y turbulentos, que fluyen en conductos de sección transversal arbitraria.

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

f = factor de fricción adimensional

L = longitud del tubo [m]

D = el diámetro de la tubería [m]

V = la velocidad media en [m/s]

g = 9,81 m/s² la aceleración de la gravedad.

A estas pérdidas hay que añadir las originadas por codos, válvulas y otros accesorios, las cuales habría que considerar cuando se tenga el diseño definitivo de la obra civil.

Tomando como base la potencia de 400 kWe, el caudal a turbinar de 1.5327 m³/s y un salto neto de 38.5 m ya se puede establecer algún tipo de turbina que se utilizaría en el río Copinula.

En la Figura 8, se presentan las principales opciones de las turbinas más reconocidas en el mercado, mostrando además los valores más importantes para escoger el tipo de turbina más adecuada para las condiciones propias del lugar. Como se puede observar la turbina Francis es la que cumple con las condiciones de un salto, caudal y potencia requeridos para el río Copinula, por lo cual como parte de un estudio preliminar a la prefactibilidad este sería un tipo de turbina que podría utilizarse en la implementación de la central en el río Copinula.

6. 1.5 metros de acuerdo a las condiciones del lugar.

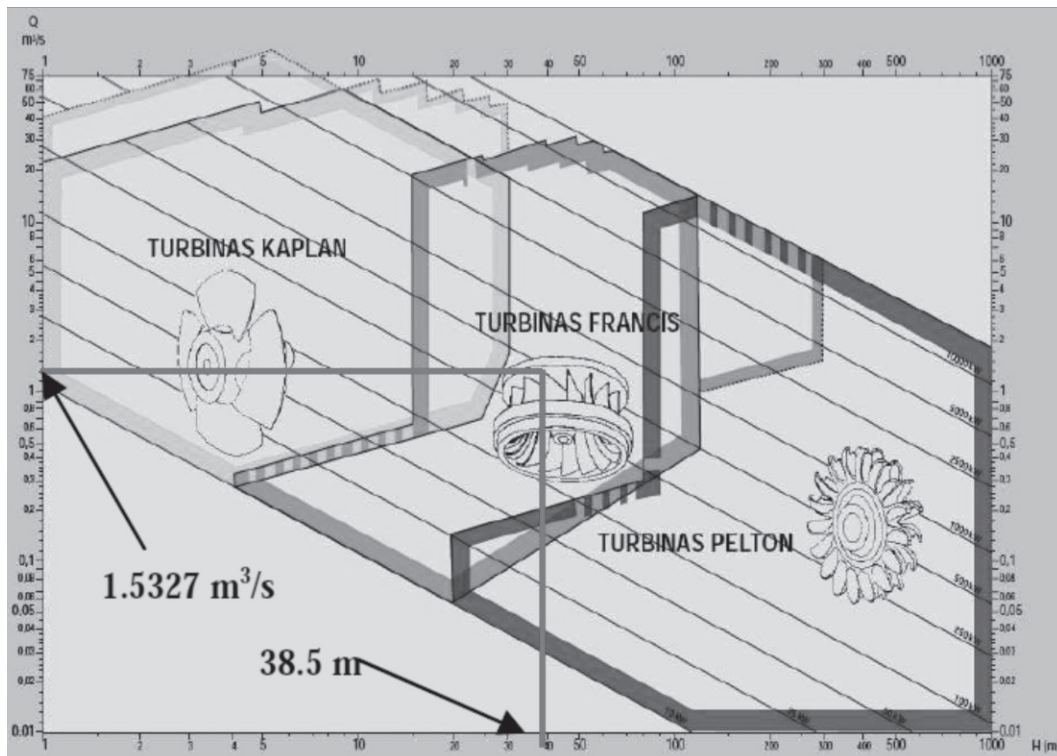


Figura 8. Principales tipos de turbinas utilizadas en centrales hidráulicas. Figura obtenida del libro *Mini hidráulica en el País Vasco*. Cortesía de VOEST-ALPINE.

6. Herramienta de software para calcular potencial eléctrico

Existen diferentes herramientas de software para pequeñas centrales hidroeléctricas que permiten calcular la potencia eléctrica que se puede obtener de algún río. Para el caso particular del río Copinula

se utilizó el software denominado HIDRO 3® para comparar los resultados calculados con los que brinda dicho software.

En la Figura 9, se muestran las principales condiciones del sitio, estableciendo principalmente las coordenadas de latitud y longitud, así como el salto.

RETScreen® Energy Model - Small Hydro Project			Training & Support
Units: <input type="text" value="Metric"/>			
Site Conditions	Estimate	Notes/Range	
Project name	Rio Copinula	See Online Manual	
Project location	Ahuachapan, El Salvador		
Latitude of project location	°N 13.79	-90.00 to 90.00	
Longitude of project location	°E -89.86	-180.00 to 180.00	
Gross head	m 40.00		
Maximum tailwater effect	m 1.50		
Residual flow	m³/s 0.05	➔ Complete Hydrology & Load sheet	
Firm flow	m³/s 1.43		
Peak load	kW 3,500		
Energy demand	MWh 18,286		

Figura 9. Condiciones del sitio utilizadas en el software.

Además de las condiciones del lugar es necesario establecer las características del sistema, considerando si se trata de un sistema aislado, el caudal de diseño, el tipo de turbina, las eficiencias y pérdidas

involucradas en los sistemas electromecánicos. Las características del sistema simuladas en el software se muestran en la figura 10.

System Characteristics		Estimate	Notes/Range
Grid type	-	Isolated-grid	
Design flow	m ³ /s	1.533	
Turbine type	-	Francis	⇒ <u>Complete Equipment Data sheet</u>
Number of turbines	turbine	1	
Turbine peak efficiency	%	88.7%	
Turbine efficiency at design flow	%	84.6%	
Maximum hydraulic losses	%	5%	2% to 7%
Generator efficiency	%	95%	93% to 97%
Transformer losses	%	1%	1% to 2%
Parasitic electricity losses	%	1%	1% to 3%
Annual downtime losses	%	2%	2% to 7%

Figura 10. Características del sistema a utilizar en río Copinula.

En la Figura 11, se presenta la producción de energía anual en el río Copinula, sin embargo, el dato a

resaltar son los 435 kW, muy similar a la capacidad determinada teóricamente.

Annual Energy Production		Estimate	Notes/Range
Small hydro plant capacity	kW	450	
	MW	0.450	
Small hydro plant firm capacity	kW	435	
Available flow adjustment factor	-	1.00	
Small hydro plant capacity factor	%	98%	40% to 95%
Renewable energy available	MWh	3,851	
Renewable energy delivered	MWh	3,851	
	GJ	13,862	
Excess RE available	MWh	0	

Figura 11. Pantalla en la que se estima la producción de energía anual.

En la Figura 12, se establece una de las opciones de turbina Francis que podría utilizarse con base a los resultados obtenidos en el río Copinula.


Small Hydro Turbine Characteristics		Estimate	Notes/Range
Gross head	m	40.00	
Design flow	m ³ /s	1.533	
Turbine type	-	Francis	<u>See Product Database</u>
Turbine efficiency curve data source	-	Standard	
Number of turbines	turbine	1	
Small hydro turbine manufacturer		ABC Ltd.	
Small hydro turbine model		model XYZ	
Turbine manufacture/design coefficient	-	4.5	2.8 to 6.1; Default = 4.5
Efficiency adjustment	%	0%	-5% to 5% 
Turbine peak efficiency	%	88.7%	
Flow at peak efficiency	m ³ /s	1.3	
Turbine efficiency at design flow	%	84.6%	

Figura 12. Características de la turbina Francis que se puede utilizar en la central del río Copinula.

Es importante, además, considerar las características de la turbina Francis a utilizar, principalmente la curva de eficiencia con la cual trabaja la misma. En la Figura 13, se muestra esta importante característica de la turbina seleccionada.

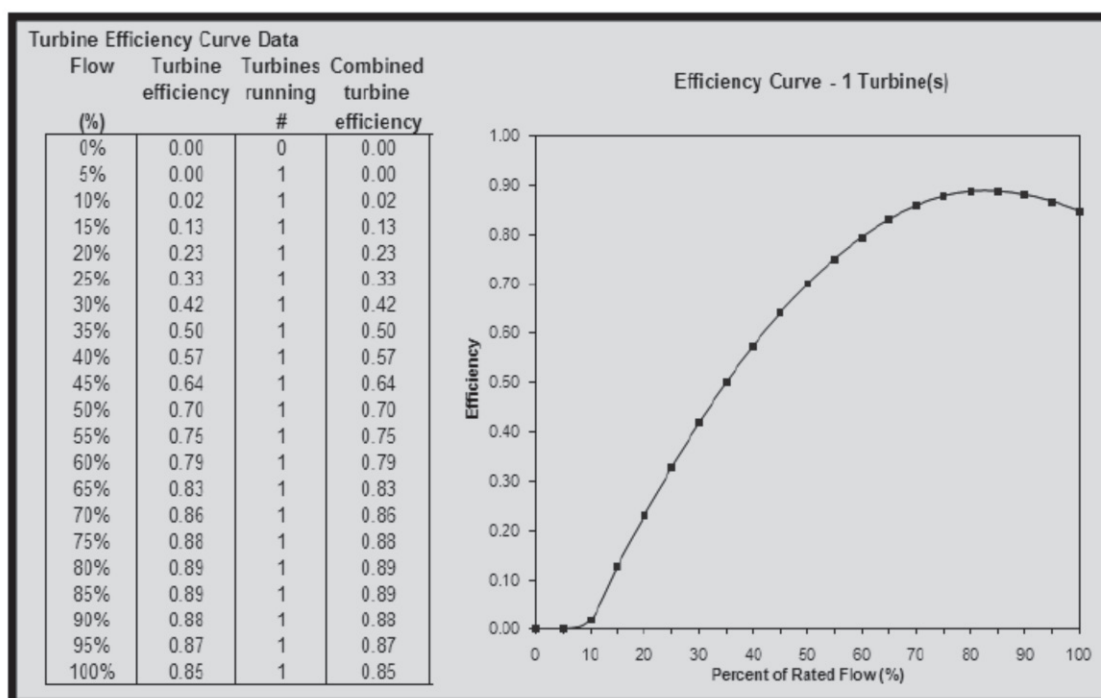


Figura 13. Curva de eficiencia de la turbina Francis seleccionada para río Copinula.

Finalmente, teniendo las características del lugar y las del equipo a utilizar se procede a establecer cómo sería el comportamiento de la turbina en el río Copinula, con el caudal de $1.5327 \text{ m}^3/\text{s}$, como se muestra la Figura 14.

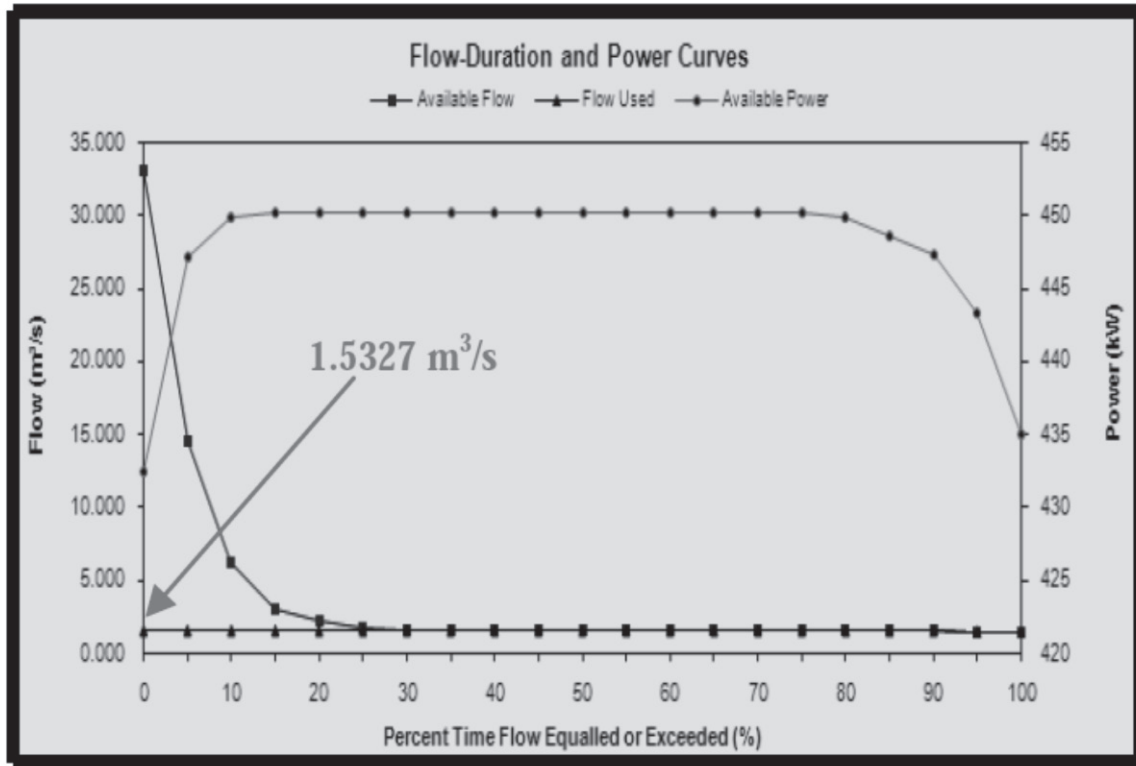


Figura 14. Curva de potencia y duración de flujo de la turbina Francis que se puede utilizar en la central del río Copinula

Con el software se puede realizar simulaciones para obtener los datos de comportamiento de varios tipos de turbinas, incluidas las más utilizadas, lo que sin duda alguna ayuda en gran manera cuando se realiza un estudio previo a la prefactibilidad.

7. Conclusiones

La selección de posibles lugares en donde se puedan instalar centrales minihidráulicas y estimar la potencia que ellas pueden proporcionar no se puede hacer de manera antojadiza; se tienen que establecer algunos criterios relacionados con la zona geográfica, y por ende, las condiciones climatológicas que rigen dicha región, ya que el éxito de este tipo de instalaciones depende de la potencia que se puede generar.

Para que la decisión de seleccionar la zona de interés sea considerada como adecuada es necesario investigar sobre las condiciones hidrológicas de la zona. Esta última debe caracterizarse como una zona de altas precipitaciones, garantizando de esta manera ríos con caudales que posean potenciales hidráulicos elevados, sin dejar del lado un punto muy importante: el salto, ya que la combinación de estas dos características de los ríos contribuyen en gran manera a la generación de potencia eléctrica.

En El Salvador, en la zona occidental, específicamente en el Río Copinula, municipio de Jujutla, departamento de Ahuchapán, se tienen condiciones favorables para la generación eléctrica por medio de centrales minihidráulicas ya que posee dos saltos de aproximadamente 40 metros y un registro histórico

de caudal de 1.5327 m³/s destinado para turbinar y generar potencia eléctrica, la cual con base a las condiciones del lugar, los registro históricos y las mediciones realizadas estaría en un rango entre los 400 kWe y 435 kWe, por lo que dicho río posee un potencial para generación eléctrica que debe aprovecharse, para el desarrollo de las comunidades cercanas y la diversificación de la matriz energética, incluyendo energías renovables, en este caso particular la energía minihidráulica.

8. Referencias bibliográficas

[1] UNESCO (2006). Evaluación de los Recursos Hídricos. Elaboración del balance hídrico integral por cuencas hidrográficas. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°4. Disponible en: http://www.unesco.org.uy/phi/biblioteca/bitstream/123456789/326/1/Manual_IMTA.pdf.

[2] UICN (2005). Proyecto BASIM, El estado de los recursos hídricos en la región hidrográfica Cara Sucia-San Pedro Belén en la zona Sur de Ahuachapán, El Salvador (recopilación y análisis) / UICN. Proyecto BASIM. - 1. ed. San José, C.R.: UICN. Oficina Regional para Mesoamérica, 62 p.; 21x28 cm. ISBN 9968-743-94-1.

[3] N. Cuellar. PRISMA (2001). Los desafíos del agua y la reforma del sector hídrico en El Salvador: La respuesta institucional.

[4] Pakistan Engineering Services (pvt.) Ltd (2010). Environmental Impact Assessment. Patrind Hydropower Project.

Cómo citar este artículo:

BLANCO, Erick. "Estimación de la potencia eléctrica teórica disponible en Río Copinula, Jujutla, Ahuachapán". Ing-novación. Revista semestral de ingeniería e innovación de la Facultad de Ingeniería, Universidad Don Bosco. Junio – Noviembre de 2012, Año 2, No. 4. pp. 33-50. ISSN 2221-1136.